

ЗЫКОВ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ

**МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПРИ
ИССЛЕДОВАНИЯХ ДИНАМИКИ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ E**

Специальность: 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань — 2014

Работа выполнена на кафедре радиоастрономии Института физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент Шерстюков Олег Николаевич

Официальные оппоненты: ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», кафедра физики,
доктор физико-математических наук,
профессор Мясников Е.Н.
ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», кафедра прикладной математики и информационных технологий,
кандидат физико-математических наук,
\ доцент Колчев А.А.

Ведущая организация: ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова»
Российской академии наук

Защита состоится «25» декабря 2014 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.081.18 в ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16а, Институт физики

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Автореферат разослан « » _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета к.ф.-м.н.

А.Д.Акчурин

Общая характеристика работы:

Актуальность темы. Среди нерегулярных явлений в ионосфере, оказывающих существенное влияние на распространение радиоволн, особое место занимает спорадический слой E (далее Es).

Слой Es является быстроизменяющимся и пространственно-неоднородным локальным плазменным образованием в ионосфере Земли, появляющимся в интервале высот от 85 до 150 км. Величина электронной концентрации этих образований может играть значительную роль при распространении дециметровых и метровых радиоволн.

Трудности изучения и прогнозирования параметров спорадического слоя E объясняются рядом обстоятельств, среди которых основными можно считать: нерегулярность появления слоев Es , отсутствие непрерывных непосредственных непрерывных измерений характеристик ионосферы при помощи ракетной техники, а также многообразие физических явлений, влияющих на возникновение и существование слоя Es .

Исследования выявили существенные нерегулярные суточные и сезонные вариации в параметрах спорадического слоя E , предположительно определяющиеся динамическими режимами мезосферы – нижней термосферы. В таком случае возникает необходимость связывать поведение указанного слоя не только с воздействием геофизических явлений, таких как магнитная или солнечная активность, но и с влиянием метеорологических факторов. В связи с этим, требуется дальнейшее проведение широких экспериментальных комплексных исследований Es -слоев и нейтральной составляющей средней атмосферы с последующим обобщением результатов их взаимосвязи, позволяющее уяснить происходящие физико-химические процессы в ионосфере и для создания адекватной физической модели слоя Es .

Для решения данной проблемы надо рассматривать как измерения с повышенной периодичностью снятия ионограмм, так и пространственно-разнесенные эксперименты. Более частые измерения сопряжены со значительным увеличением количества получаемых ионограмм, что приводит к повышению трудоемкости и сокращению времени, отводимого на обработку результатов в реальном времени, поэтому более быстрая и надежная, чем ручная, автоматическая обработка ионограмм также является актуальной, так как тенденция перехода к учащенным измерениям является мировой. В научном коллективе, где работает автор, была выполнена работа по модернизации ионосферного комплекса «Циклон», направленная на уменьшение временного интервала между сеансами зондирования и регистрацию не только амплитуды, но и фазы принимаемого сигнала.

Из-за изменчивости ионосферных условий на данный момент не существует надежных программ для интерпретации ионограмм. Учитывая сложность обработки и интерпретируемости ионограмм, а также и разнообразие и специфичность методов цифровой обработки изображений, необходимо иметь некоторые наборы алгоритмов, предназначенные для реализации каждого этапа обработки изображений, а как следствие – для каждой конкретной ионограммы выбирать оптимальную последовательность их выполнения, т.е. необходима предварительная классификация исходной информации для выбора наилучшего алгоритма, реализующего данный этап.

Решение комплекса вышеописанных проблем позволит перейти к оперативному прогнозу параметров слоя E_s и дальнейшему изучению взаимосвязи его суточно-сезонных вариаций с динамикой нижней атмосферы.

Цель и основные задачи работы – повышение скорости обработки ионосферных данных по ионограммам вертикального зондирования для исследования пространственно-временных характеристик спорадического слоя E .

В соответствии с поставленной целью решались **следующие задачи**:

- 1) создание программного обеспечения к разработанному в коллективе ионосферному комплексу вертикального зондирования для проведения долговременного мониторинга ионосферы в сетевом и исследовательском режимах с повышенным частотным и временным разрешениями. Модификация алгоритмов программного обеспечения для использования ионозонда в качестве КВ-локатора, позволяющего регистрировать быстротекущие процессы, такие, как динамика пространственно-временных вариаций спорадического слоя E ;
- 2) разработка методик и программ автоматической обработки данных ионозондов вертикального зондирования ионосферы;
- 3) исследование пространственно-временных вариаций интенсивности спорадического слоя E на основе ионограмм вертикального зондирования

Методика проведения исследований. Для решения поставленных выше задач были использованы методы статистической радиофизики и алгоритмы фильтрации. Экспериментальные исследования проведены с применением методов вертикального зондирования и КВ-локации.

Эффективность алгоритмов обработки данных проверялась при помощи натурных экспериментов и статистических методов оценки.

Научная новизна результатов исследования заключается в том, что:

- 1) разработанные программы и алгоритмы управления работой ионосферного комплекса могут использоваться при создании современных цифровых ионозондов, с повышенным временным и частотным разрешениями. Отработана методика и проведены натурные эксперименты по использованию ионозонда в качестве локатора декаметрового диапазона фиксированных частот для исследования сигналов обратного ракурсного рассеяния радиоволн от искусственных ионосферных неоднородностей;
- 2) разработаны, реализованы и апробированы оригинальные методики и алгоритмы автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования;
- 3) впервые установлены пространственно-временные вариации в частотных параметрах слоя E_s , согласовывающиеся с присутствием планетарных волн в мезосфере – нижней термосфере и выявлены скорости перемещения высокоинтенсивных E_s в зональном и меридиональном направлениях.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

- 1) создан пакет программного обеспечения цифрового ионосферного комплекса вертикального зондирования «Циклон», обеспечивающий ионосферные измерения в сетевом и исследовательском режимах, а также в режиме КВ-локатора, и позволяющий обрабатывать, визуализировать, архивировать и передавать полученную информацию по сетевым каналам связи (ftp и POP3 протоколы) в автоматическом режиме;
- 2) разработаны алгоритмы автоматической очистки ионограмм и интерпре-

тации ионосферных слоев. Созданы законченные программы, производящие обработку ионограмм для ионозондов семейства «Циклон», «Сойка-М», «Бизон», «Базис-МС», «Вертикаль-С1» «CADI». Разработаны методы повышения точности обработки ионограмм и классифицированы ситуации, приводящие к некорректной обработке в автоматическом режиме;

3) выявлены планетарно-волновые закономерности параметров слоя E_s , их зависимости от орографии. Определены преобладающие направления дрейфа высокоинтенсивных спорадических E -слоев, связанные с зональным и меридиональным переносом. Получены данные для построения адекватных физических моделей спорадического слоя E .

На защиту выносятся:

1) алгоритмы программного обеспечения цифрового ионосферного комплекса и методики использования ионозонда вертикального зондирования в качестве КВ-локатора для исследования обратного рассеяния радиоволн от искусственных ионосферных неоднородностей;

2) методики автоматической обработки и интерпретации ионосферных данных вертикального зондирования, применение экспресс-анализатора для улучшения обработки и оценки достоверности полученных ионосферных параметров с привлечением, при необходимости, внимания оператора, позволяющее повысить репрезентативность обработанных данных;

3) результаты исследований планетарно-временных закономерностей в частотных параметрах слоя E_s , согласовывающиеся с существованием планетарных волн в мезосфере – нижней термосфере, их долготные и сезонные различия, а также скорости перемещения высокоинтенсивных спорадических слоев E .

Реализация результатов работы

1) Разработанные алгоритмы и реализованные программные модули использовались при разработке ионосферного комплекса «Вертикаль-С1» (ЦКБ «Полус», Воронеж), прошедшего государственные испытания и подготовленного к тиражированию. Система автоматической обработки ионограмм была реализована для ионозондов "Бизон" и передана в НИИССУ. На базе ионосферного комплекса «Циклон-GPS» для ИЗМИРАН была произведена модернизация ионозондов «Базис-МС». Имеются акты о внедрении.

2) Исследования по теме диссертации в 2001-2014 гг. поддержаны грантами, где автор являлся соисполнителем:

- РФФИ 01-05-65251 (2001–2003) Волновые процессы и турбулентность в термосфере;

- РФФИ 03-05-96187 (2003–2005) Исследование термодинамического состояния нижней, средней и верхней атмосферы Земли на основе мониторинга фундаментальных параметров нейтральной и заряженной компонент;

- РФФИ 03-07-90288, (2003–2005) Информационная система геофизической информации Казанского университета;

- РФФИ 06-05-65150-а, (2006–2008) Исследование неоднородной структуры средней ионосферы под воздействием динамики нейтрального ветра;

- РФФИ 08-02-01188-а, (2008–2010) Исследования параметров ионосферной плазмы, модифицированной мощным радиоизлучением, в оптическом диапазоне длин волн;

- РФФИ 11-02-00125-а (2011–2013) Мониторинг и управление состоянием

искусственной ионосферной турбулентности с использованием широкополосного радиозондирования и адаптивных режимов воздействия на плазму;
- РФФ 14-12-00706 (2014–2016) Нелинейные плазменные процессы в верхней ионосфере на средних и высоких широтах при воздействии мощными радиоволнами.

3) Результаты диссертации использовались при выполнении различных государственных и хозяйственных тем Казанского университета.

Достоверность результатов и научных положений обусловлена статистической надежностью большого объема измерений, проведенных за период с 1994 г. по 2014 г., совпадением результатов экспериментальных исследований и обработанных данных с имеющимися модельными представлениями и выводами других исследователей.

Эффективность разработанных программных алгоритмов подтверждена натурными полевыми испытаниями, которые показали хорошую повторяемость результатов на больших массивах экспериментальных данных.

Апробация работы

Основные результаты работы опубликовывались в международных и Всероссийских реферируемых научных журналах, а так же докладывались и обсуждались на XVIII–XXIV Всесоюзных (Всероссийских) конференциях по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 1996; Казань, 1999; Н.Новгород, 2002; Йошкар-Ола, 2005; Лоо, 2008; Йошкар-Ола, 2011; Иркутск, 2014); на V Российской конференции по атмосферному электричеству (Владимир, 2003); Международном симпозиуме проблем геокосмоса (Санкт-Петербург, 2004); Международной конференции «Фундаментальные проблемы физики» (Казань, 2005); XII Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости (Вроцлав, Польша, 1994); XXIII, XXVIII Всероссийских симпозиумах «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2005, 2013); IX конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (Иркутск, 2006); VII Международного симпозиума URSI по модификации ионосферы мощным радиоизлучением (Суздаль, 2007); Международной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (Таганрог, 2008), XV научной конференции по радиофизике (Н.Новгород, 2011), а также представлялись на XXIV, XXV Генеральных Ассамблеях URSI (Киото, Япония, 1993; Лилль, Франция, 1996); на XXXI–XXXV Научных Ассамблеях COSPAR (Бирмингем, Англия, 1996; Нагойя, Япония, 1998; Варшава, Польша, 2000; Хьюстон, США, 2002; Париж, Франция, 2004); на XXI, XXII, XXIV Генеральных Ассамблеях IUGG (Боулдер, США, 1995, Бирмингем, Англия, 1999, Саппоро, Япония, 2003); на VIII Научной Ассамблее IAGA (Упсала, Швеция, 1997); на XXII, XXV, XXVII Генеральных Ассамблеях EGS. (Вена, Австрия, 1997; Ницца, Франция, 2000, 2002); на XIII Международном симпозиуме IES (Александрия, США, 2011) и докладывались на различных научных семинарах и ежегодных отчетных конференциях Казанского университета (1995–2014).

Публикации

Основные положения по теме диссертации опубликованы в 26 печатных работах, в том числе в 5 статьях журналов, рекомендованных ВАК: «Геомагнетизм и аэрономия», «Изв. ВУЗов. Радиофизика»; в статье, депонированной в ВИНТИ, а также в статьях сборников "Исследовано в России",

"Ионосферные исследования" (МГК), Report UAG и др. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, входящих в состав программного обеспечения ионосферного комплекса вертикального зондирования «Циклон»

Личный вклад автора. Диссертант внес существенный вклад: в формулирование задач исследования пространственно-временных характеристик спорадического слоя E , разработку алгоритмов модулей управления ионосферными комплексами, обработки ионограмм и их практическую реализацию, отработку методов регистрации и осуществление экспериментальных измерений, анализ и интерпретацию полученных ионосферных данных, разработку методик и алгоритмов расчета, подготовку печатных публикаций. Автор являлся исполнителем работ по созданию программного обеспечения измерительного ионосферного комплекса «Циклон», участвовал в натурных измерениях ионосферных параметров в 1994 – 2014 гг., осуществлял анализ и интерпретацию результатов измерений.

Экспериментальные исследования обратного рассеяния радиоволн на коротких трассах от искусственных ионосферных неоднородностей на коротких трассах проведены в кооперации с научными группами НИРФИ, ЮФУ, МГУ и ИЗМИРАН.

Учитывая, что натурные испытания и обработку значительного объема полученных экспериментальных данных невозможно провести единолично, роль автора заключалась в постановке задач и участии в составлении программ экспериментов, а также их проведении, обработке и систематизации полученных данных. По этой причине многие публикации диссертанта имеют соавторство.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 164 страницы основного текста, 46 иллюстраций, 1 таблицу и список цитируемой литературы из 114 наименований.

Основное содержание диссертации

Во введении показывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи исследования, обосновываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов работы, приводится структура диссертации..

В первой главе диссертации рассматриваются экспериментальные установки для мониторинга и исследования ионосферы методами вертикального и наклонного зондирования.

Приводятся технические характеристики, общее устройство и принципы действия ионосферного комплекса «Циклон». Работа комплекса может производиться в сетевом режиме вертикального или наклонного зондирования для исследования характеристик ионосферных слоев с регистрацией амплитуды и фазы импульсного сигнала на скользящей частоте, а также в исследовательском, для мониторинга уровня сигнала на отдельно выбранных фиксированных частотах зондирования

В сетевом режиме комплекс позволяет производить регистрацию ионо-

грамм с периодичностью до 1 минуты и точностью отсчета высоты отражения сигнала, равной ≈ 700 м, с регистрацией уровня сигнала в динамическом диапазоне более чем 60 дБ, с возможностью независимого управления коэффициентом усиления радиоприемного устройства на каждой частоте.

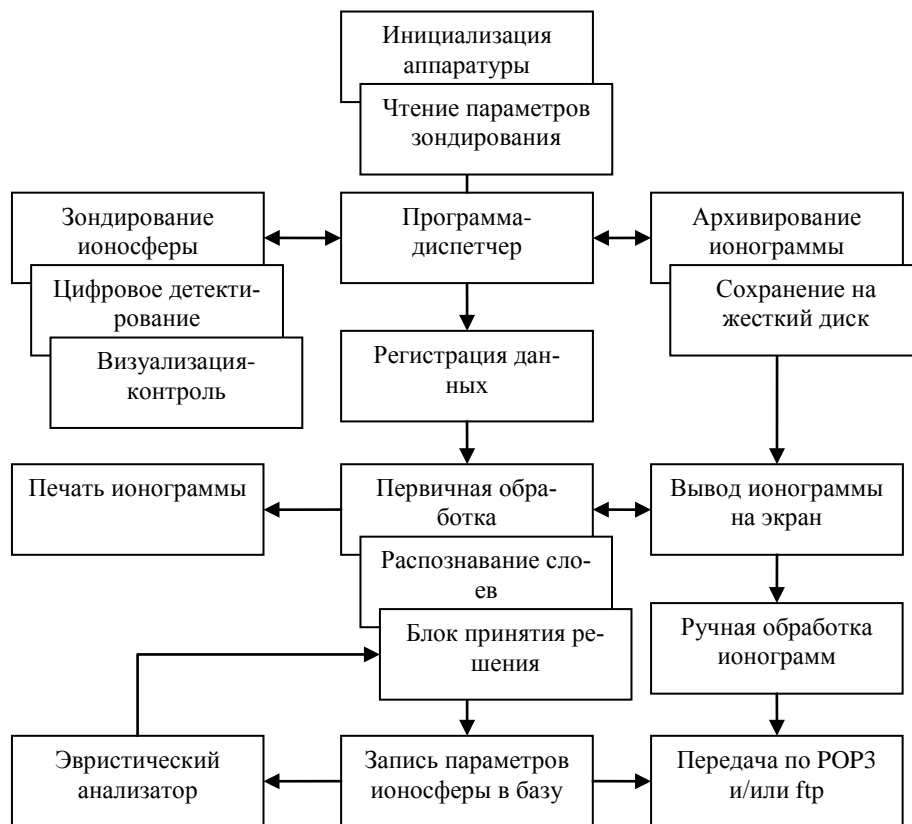


Рис. 1. Структурная схема программного обеспечения ионозондов «Циклон»

Описаны структура и программные алгоритмы комплекса, которые позволяют осуществлять управление режимами работы комплекса, регистрацию и запись ионограмм,

обработку данных в автоматическом или интерактивном режимах. Общая структура программы «Циклон-Рapid» представлена на рис.1.

Представлены результаты применения ионозонда для исследований частотной зависимости обратного ракурсного рассеяния (ОРР) радиоволн от искусственных магнитоориентированных неоднородностей над нагревным стендом «СУРА». Типичная ионо-

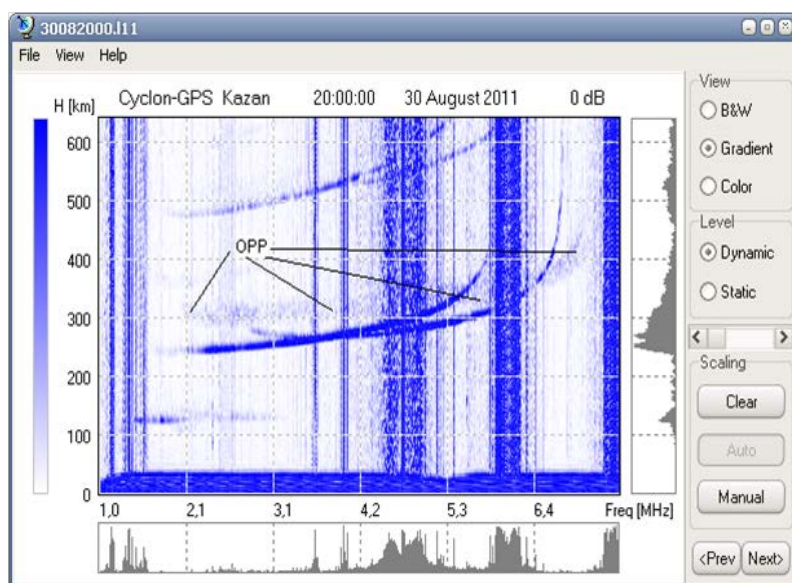


Рис. 2. Типичная ионограмма ионозонда «Циклон» с наблюдаемыми сигналами ОРР для 20:13 6 сентября 2010 г.

грамма ионозонда «Циклон» с наблюдаемыми сигналами обратного ракурсного рассеяния приведена на рис.2. В результате проведенной серии экспериментов по наблюдению ОРР на коротких трассах показана возможность исследования параметров искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностей с помощью радиоволн в нижней части КВ диапазона ($\approx 2 - 10$ МГц). При этом показана возможность реализации ракурсных условий рассеяния как для обыкновенной, так и необыкновенной мод распространения зондирующих радиоволн.

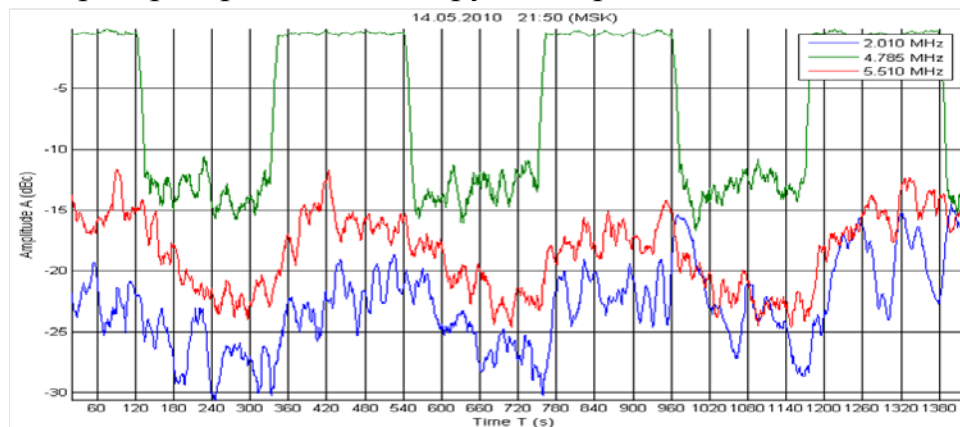


Рис. 3. Амплитудные реализации сигналов ОРР на выбранных частотах для 21:50 14 мая 2010 г.

точной зависимости времен развития и релаксации неоднородностей и диагностического искусственного радиоизлучения.

Обнаружено одновременное возрастание в 5-10 раз (до 100 с) времен релаксации неоднородностей с масштабами 45-125 м и диагностического излучения при переходе от дневных к ночным измерениям, связываемое с ростом продольных масштабов неоднородностей в 2-3 раза при их релаксации в режиме продольной диффузии.

Во второй главе диссертации представлены результаты методики компьютерной обработки ионограмм.

Основной задачей при обработке и очистке ионограмм является обнаружение отраженного импульса на фоне помех от мешающих радиопередатчиков и шумов эфира. Для выделения сигнала среди помех необходима априорная информация о статистических свойствах помехи. Однако из-за большого диапазона рабочих частот и быстрой динамики изменения ионосферной обстановки параметры помехи заранее неизвестны, а их оценка непосредственно в режиме зондирования приводит к неоправданному усложнению как самого эксперимента, так и обработки полученных данных.

Необходимо выделить частоты, на которых имеются сосредоточенные помехи, и исключить результаты измерений на этих частотах. Однако, если их полностью исключить из рассмотрения, могут возникнуть недопустимые погрешности при дальнейшем построении высотно-частотной характеристики и идентификации ионосферных слоев.

В процессе опытной эксплуатации ионосферного комплекса алгоритм автоматической интерпретации следов ионосферных слоев неоднократно подвергался модернизации. Так, в частности, для распознавания ионосферных слоев в настоящее время в программе «Циклон-Рapid» реализован метод

Исследовалась динамика сигнала ракурсного рассеяния. Пример графика полученных амплитудных реализаций приведен на рис.3.

Проведен анализ и сопоставление су-

быстрого анализа ионосферной информации по высотным (h) и частотным (f) гистограммным распределениям ионограммы. Предложенный метод отличается намного меньшей трудоемкостью при практической реализации, связанная с меньшим количеством эмпирических правил по сравнению с методом трафаретных масок. Программа была написана в виде модулей, встраиваемых в программное обеспечение ионосферного комплекса «Циклон», разработанного в Казанском университете с учетом требований совместимости с существующим программным обеспечением комплекса.

Преимуществом данного метода является то, что он оперирует с относительно большими областями на ионограмме, а не с отдельными точками, и, следовательно, не так чувствителен к помехам. Такие преимущества особенно проявляются при обработке ионограмм с низким отношением сигнал/шум. Также необходимо отметить, что применявшийся в ионозонде ранее метод составления «шнуров» не мог корректно обрабатывать некоторые ионосферные параметры – например, он не мог распознавать F -рассеяния. Рассмотрим подробнее работу метода гистограммной обработки.

На предварительно очищенной от шума ионограмме строятся нормированные гистограммы по всему частотному и высотному диапазонам. Полученные ионограммы подвергаются фильтрации сглаживающими (гауссовские-НЧ или Добеши-вейвлет) фильтрами. Случайная сосредоточенная помеха, при рассмотрении ее во времени (то есть при рассмотрении отсчетов разных высот одной частотной реализации), проявляет себя, в общем случае, как гауссовский шум, который, как известно, лучше всего сглаживается простым низкочастотным фильтром. При рассмотрении перехода между реализациями на соседних частотах низкая корреляция между шумовыми помехами эфира приводит к тому, что помеха становится импульсной и лучше всего удаляется медианным фильтром. Таким образом, «анизотропность» шума требует применения разных фильтров для обработки частотных и высотных гистограмм.

На следующем этапе обработки высотная гистограмма подвергается разделению на две рабочие области – верхнюю и нижнюю ионосферу. В области нижней ионосферы производится исследование на предмет обнаружения отражений от области E (слои E и E_s), в области верхней – от области F (слои $F1$ и $F2$). Рабочие высоты берутся из рекомендаций Международного союза исследований радиоволн URSI.

На высотной гистограмме E области находится первый главный максимум $Max I_{hE}$ (1) (здесь и далее обозначения относятся к рис. 4). Далее, от него вверх и вниз по высоте h производится исследование гистограммного распределения. Ищутся высоты, для которых в окрестности n на гистограмме сигнал от отраженного следа становится равным нулю, и запоминаются минимальное и максимальное значения высот, на которых сигнал еще наблюдается (hE_{min} и hE_{max} , при $h_i > 0$). Для выделенного диапазона высот строится новое локальное частотное гистограммное распределение. Следует обратить внимание, что это распределение уже не подвергается фильтрации, дабы не потерять мелкие детали от следа отраженного слоя. На частотном распределении, начиная с максимальной частоты, ищется начало отражения от ионосферного слоя. Начало считается найденным, если в окрестности n нескольких точек присутствует хотя бы одна частота, имеющая сигнал ($f_i > 0$). В мас-

сив значений для E области заносятся минимальная высота hE_{min} , на которой еще наблюдается сигнал, и найденная критическая частота E слоя.

Далее, на высотной гистограмме для E области производится поиск дополнительного максимума. Если локальный максимум $Max2_{hE}$ (2) найден, процесс построения нового локального частотного распределения и поиск критической частоты производятся аналогично описанному выше алгоритму.

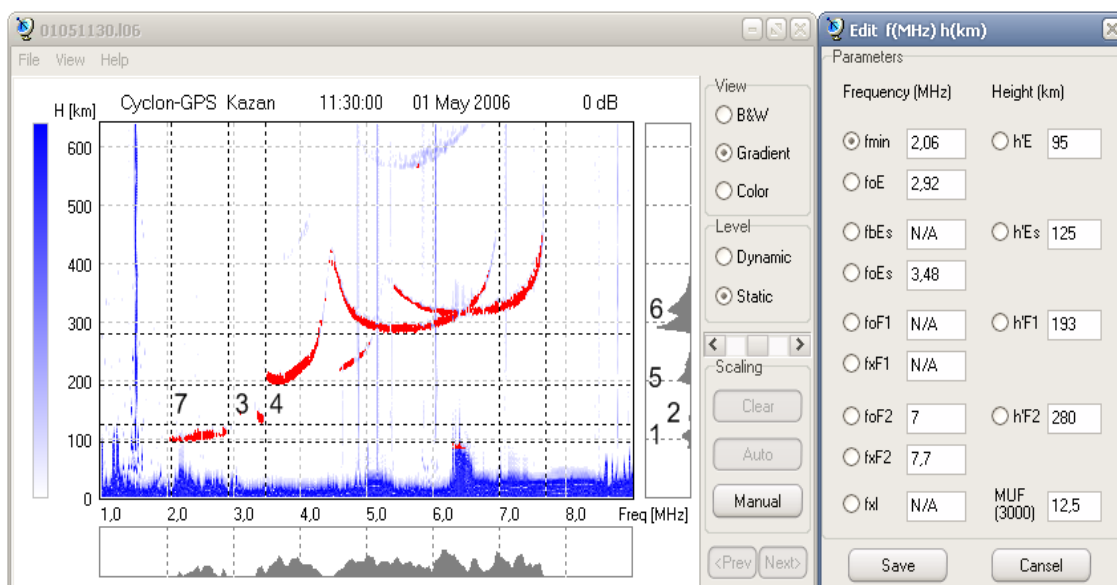


Рис. 4. Ионограмма с выделенными областями и оцифрованными ионосферными параметрами

Если дополнительный максимум существует, то производится сравнение критических частот на предмет соответствия конкретному ионосферному слою. Большей частоте производится предварительное присваивание индекса критической частоты для слоя E_s , меньшей – для слоя E .

По таблицам URSI для суточного хода критической частоты слоя E проверяется попадание данного параметра в диапазон вероятных значений. Если полученное значение $foEs$ лежит в окрестности табличного foE , а полученное значение foE много меньше его ($foEs - foE > 2$ МГц), то принимается гипотеза, что полученное значение $foEs$ в действительности соответствует foE и, соответственно, присваивается ему, а прежнее foE удаляется и в дальнейшем рассмотрении не участвует. Если же в высотной области E наблюдается только один гистограммный максимум, то интерпретация следа производится из вышеописанных табличных данных URSI. Если критическая частота располагается в диапазоне табличных данных для E слоя, то параметру присваивается индекс foE , в противном случае – индекс предельной частоты $foEs$. В массив данных заносятся данные критической частоты foE и/или предельной частоты $foEs$ (3 и 4), а соответствующие минимальные высоты hE_{min} , где сигнал для этих слоев еще наблюдался – в соответствующие параметры $h'E$ и/или $h'Es$.

Анализ верхней ионосферы производится аналогичным образом. Рекомендованные значения URSI в данном случае помогают интерпретировать $F1$ и $F2$ слои по различным высотам их расположения и существованию слоя $F1$ в зависимости от времени суток. Если принимается гипотеза о существова-

нии слоя $F1$ (5), то на высотной гистограмме в верхней ионосферы находится главный максимум $Max1_{hF}$ (6). Если на небольшом расстоянии ($\Delta h < 50$ км) вниз от него находится второй по величине максимум $Max2_{hF}$, величина которого, по крайней мере, не менее половины главного максимума ($2 \cdot Max2_{hF} \geq Max1_{hF}$), то принимается гипотеза о том, что главный максимум – отражение от необыкновенной компоненты слоя $F1$, и в дальнейшем в рассмотрении он не участвует, а второй нижний максимум – от обыкновенной компоненты этого же слоя, и он становится главным ($Max1_{hF} = Max2_{hF}$). От главного максимума $Max1_{hF}$ вниз ищется точка перегиба. Эта высота и принимается за высоту $h'F1$.

Нахождение $fmin$ состоит из выделения наиболее низкочастотной непрерывной области соответствующей гистограммы, содержащей ненулевые значения в некоторой окрестности n (7).

На следующем этапе области ионограммы, не относящиеся к ионосферным слоям, принудительно обнуляются, а оставшиеся шумы обрабатываются методом удаления изолированных точек и кратников. Получившаяся таким образом обработанная ионограмма выводится на экран.

Далее вычисляется максимально применимая частота (MUF) с учетом кривизны Земли для тонкого слоя:

$$MUF_D = f_o F \cdot \sqrt{(4 \cdot (hF + D^2/8 \cdot R_0)^2 + D^2) / (hF + D^2/8 \cdot R_0)^2},$$

где MUF – максимально применимая частота, $f_o F$ – критическая частота слоя F , hF – высота слоя F , R_0 – радиус Земли, D – расстояние между приемником и передатчиком.

Для количественной оценки точности работы анализатора ряды данных, полученные в результате автоматической обработки, сравнивались с аналогичными рядами, обработанными вручную.

Анализ полученных данных показал, что гистограммный экспресс-анализ позволяет корректно обрабатывать около 80% ионограмм. Коэффициент ранговой корреляции по Кендаллу при этом между этими реализациями рядов колеблется в диапазоне 0,8–0,84. По точности это сравнимо с другими алгоритмами, реализованными в промышленных ионизондах, несмотря на то, что, в отличие от комплекса «Циклон», в некоторых из них реализовано аппаратное разделение обыкновенной и необыкновенной компонент, что сильно облегчает работу программы распознавания.

На рис. 5 приведена сводная гистограмма по частотному распределению ошибок для трех различных программ автоматической обработки. Ста-

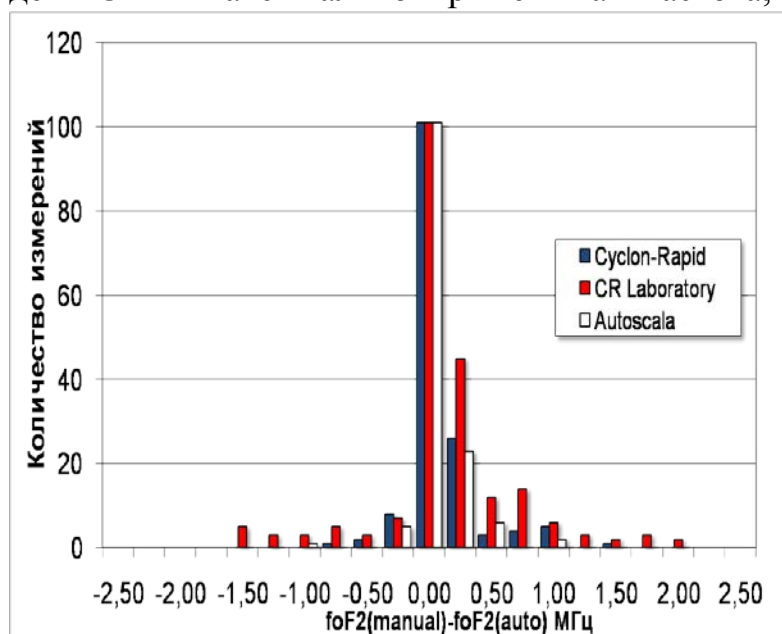


Рис. 5. Сравнение точностных характеристик различных программ обработки ионограмм

На рис. 5 приведена сводная гистограмма по частотному распределению ошибок для трех различных программ автоматической обработки. Ста-

тистический анализ показал, что экспресс-анализатор может давать сбои при наличии сильных кратковременных электромагнитных помех в момент зондирования, при этом, как правило, предыдущая и последующая ионограммы обрабатывались корректно, что иллюстрирует рис. 6.

Для повышения точности работы экспресс-анализатора в программу «Циклон-Рапид» был введен логический анализатор. При нахождении ионосферных параметров, полученные значения на конечном этапе сравниваются с данными, полученными и обработанными во время предыдущего сеанса зондирования.

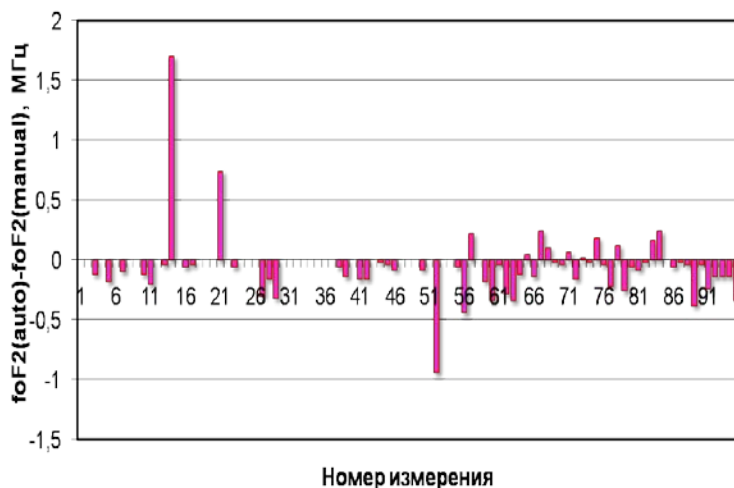


Рис. 6. Последовательность ошибок $foF2_{auto} - foF2_{manual}$ в течение суток (2 мая 2006 г.)

При существовании таких данных проверяется взаимное соответствие параметров. Если разброс между ними не укладывается в доверительный интервал, то производится поиск отражений в окрестности полученных предыдущих значений.

Величины доверительных частотных и высотных интервалов вычисляются в зависимости от исследуемого параметра и от сезонного значения. При невозможности нахождения в этих областях отражений загружаются подпрограммы

ручной обработки и предлагается либо ввести данные самостоятельно, либо согласиться с полученными экспресс-анализатором результатами. Данное дополнение позволило не только снизить погрешности измерений анализатором, но и существенно повысить репрезентативность полученных данных путем возможности привлечения оператора в затруднительных случаях.

Применение логического анализатора позволяет отследить и устранить около 80% встречающихся ошибок, описанных выше.

В третьей главе диссертации представлены результаты проверки разработанных методик исследований влияния процессов в верхней мезосфере - нижней термосфере на параметры слоя E_s .

На высотах 80-110 км особенно важными и недостаточно изученными являются процессы волнового воздействия динамических процессов верхней мезосферы - нижней термосферы на ионосферу, в частности, спорадический слой E . В слое E_s наблюдаются значительные нерегулярные суточно-сезонные вариации его интенсивности (или величины электронной концентрации в максимуме слоя), что определяется, главным образом, динамическим режимом нейтрального ветра в мезосфере и нижней термосферы. Можно говорить, что в области E также имеет место метеорологический контроль E_s -слоев.

Изучение влияния метеорологических эффектов на E_s -слой проводи-

лось на основе рассмотрения пространственных (ежечасных, среднесуточных и т.д.) распределений частотных параметров E_s -слоев в разные сезоны года. Исследовались эффекты крупномасштабных метеорологических возмущений в вариациях параметров ионосферного спорадического слоя E на основе совместного анализа взаимодействия атмосферных процессов на различных высотных уровнях. Производилось совершенствование методики выделения стационарных и нестационарных планетарных волн и выделение пространственных и временных закономерностей в параметрах слоя E_s , изучались закономерности его перемещения.

Необходимо отметить, что из-за сложности процессов воздействия нижней и средней атмосфер на ионосферу основная масса работ по атмосферно-ионосферным связям до сих пор имеет, в основном морфологический, статистический характер.

В работе использовался массив международных ионосферных данных станций вертикального зондирования с 1957 г. по 1990 г. ионосферной цифровой базы данных, полученный из Национального Геофизического Центра Данных (NGDC).

Обычно в качестве показателя интенсивности спорадического слоя E используются значения предельной частоты $foEs$, регистрируемые при импульсном вертикальном зондировании ионосферы. В данной работе применялся параметр

$$\partial foEs = foEs - \overline{foE},$$

где $foEs$ – предельная частота слоя E_s , а \overline{foE} – медианное значение критической частоты E -слоя.

Это позволило исключить в среднесуточных и среднемесячных значениях интенсивности предельной частоты $foEs$ влияние изменений фоновой ионизации.

Медленность распространения, большие пространственные и временные масштабы планетарных волн обуславливают их фундаментальную роль в погодообразующих процессах. Обнаружение и исследование планетарных волн в ионосфере имеют важное значение для решения проблемы общей циркуляции в верхней ионосфере и ионосферного прогноза погоды.

На основе анализа 30-летнего временного ряда ионосферных данных были выделены планетарные волны с волновыми числами $m=1,2,3$ и исследованы их параметры. Обнаружено существование планетарных волн в спорадическом слое E_s во все времена года и построены их сезонные распределения.

Характер наблюдающихся волн можно считать квазипериодическим, т.е. имеющих наличие участков со стационарной или медленно изменяющейся фазой, перемежающихся резким фазовыми скачками в течение 1–2 суток с последующим появлением волны имеющей другую начальную фазу. Области зарождения этих волн определяются двумя хорошо очерченными географическими регионами – 30–60°Е и 210–240°Е. Скорости перемещения планетарных волн меняются от 3 м/с до 40 м/с, а преимущественное направление перемещения этих волн – с востока на запад.

На рис. 7 в виде круговой диаграммы представлено распределение начальных фаз волн для моментов их выделения (проявления) для 1970–1979 гг.

Были рассмотрены горизонтальные перемещения интенсивного среднеширотного слоя E_s по данным сети ионозондов вертикального зондирования: Москва (55,5°N, 37,3°E), Казань (55,47°N, 49,07°E). Ионосферные данные казанской станции были получены ионозондом «Циклон», московские данные снимались ионозондом «Парус», установленным в ИЗМИРАН, и обладающего сходными техническими характеристиками.

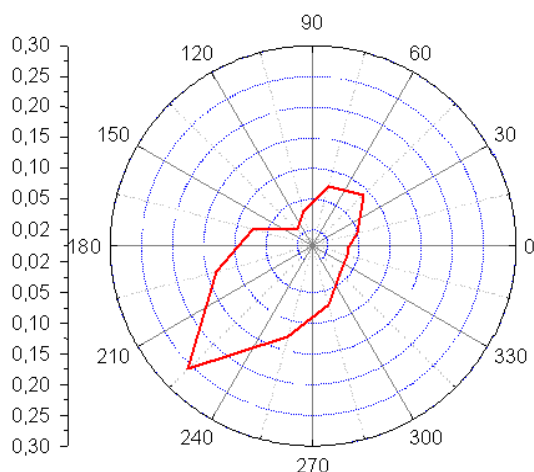


Рис. 7 Диаграмма распределения начальных фаз планетарных волн с $m=1$ при их зарождении

Направление перемещений интенсивных E_s -слоев определялось методом подобия (или подобных временных вариаций), когда пик предельной частоты E_s -слоя можно наблюдать сначала на одной станции, а затем, спустя некоторое время, - на другой. Одновременные и спорные случаи опускались. Одновременность, по-видимому, является кажущейся и связана с большим временным шагом (15-30 мин) между отсчетами foE_s .

К интенсивным E_s -слоям относились лишь те, чья предельная частота превышает фоновую (критическую частоту слоя E) в 2,5 раза. Поэтому для изучения были выбраны следующие

пять месяцев: май, июнь, июль, август, сентябрь.

На следующем этапе работы в полученных рядах данных выявлялись высокоинтенсивные слои E_s с предельными частотами выше 6 МГц, а именно, при появлении в течение трех-четырех часов (максимальное время жизни E_s) трёх пиков (максимумов электронной концентрации) считалось, что перемещение слоя E_s зарегистрировано.

Суть анализа состояла в поиске близко лежащих максимумов интенсивности E_s слоя. Если известно географическое расположение станций, то при расположении максимумов электронной концентрации над этими станциями друг от друга в диапазоне от одного до четырех часов можно предположить направление движения E_s слоя от первой станции ко второй, и наоборот. Выявленные скорости зонального перемещения интенсивных спорадических E -слоев между парами станций, составившие $\approx 102 \div 112$ м/с.

Гистограмма распределения скоростей перемещения спорадического слоя E на трассе Москва–Казань приведена на рис. 8.

Для более углубленного изучения зонального переноса среднеширотного спорадического слоя E была выбрана цепочка из следующих трёх ионосферных станций вертикального зондирования: Москва (55,5°N, 37,3°E),

Горький (56,1°N, 44,3°E), Свердловск (56,4°N, 58,6°E). Все три станции попадают в широтный интервал 55,5°N – 56,4°N, данные о предельной частоте слоя E_s для них присутствуют в пределах 15-летнего интервала времени с 1958 г. по 1972 г.

При анализе данных были выявлены квазидвухлетние вариации в зональных перемещениях высокоинтенсивных спорадических слоев E для периода с мая по сентябрь на высоте 110 км. Такой вывод дает повод предпо-

ложить о взаимосвязи этой периодичности с квазидвухлетней осцилляцией (КДО), проявляющейся наиболее четко в зональной составляющей экваториального стратосферного ветра.

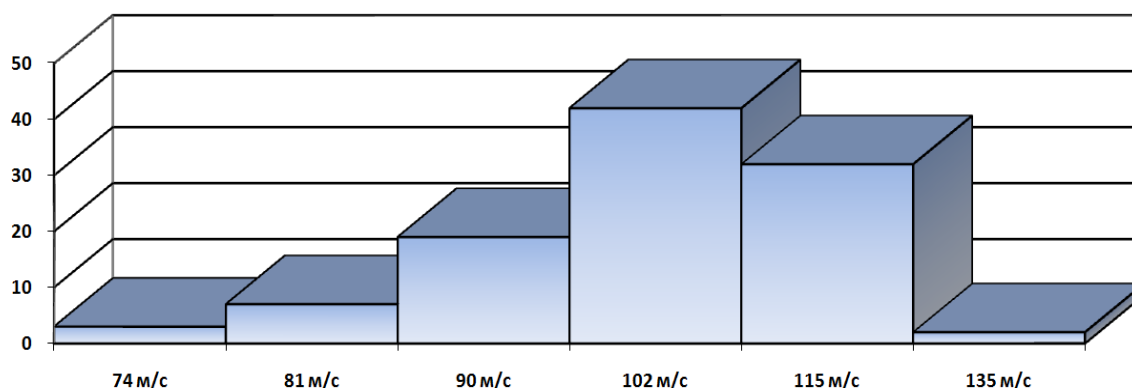


Рис. 8. Гистограмма распределения скоростей E_s на основе данных вертикального зондирования (Москва–Казань)

Были определены скорости зонального перемещения интенсивных спорадических E -слоев между парами станций, составившие $\approx 110 \div 120$ м/с.

Для исследования меридионального переноса были выделены три цепочки, каждая из которых включает три станции: Ашхабад ($37,9^\circ\text{N}$, $58,3^\circ\text{E}$), Свердловск ($56,4^\circ\text{N}$, $58,6^\circ\text{E}$), Новоказалинск ($45,5^\circ\text{N}$, $62,1^\circ\text{E}$), Новосибирск ($54,6^\circ\text{N}$, $83,2^\circ\text{E}$), Томск ($56,5^\circ\text{N}$, $84,9^\circ\text{E}$), Норильск ($69,4^\circ\text{N}$, $88,1^\circ\text{E}$), Grand Bahama ($26,6^\circ\text{N}$, $281,8^\circ\text{E}$), Washington ($38,7^\circ\text{N}$, $282,9^\circ\text{E}$), Fort Monmouth ($40,4^\circ\text{N}$, $285,9^\circ\text{E}$).

При анализе данных этих цепочек станций методом, описанным выше, выявлено, что большая часть высокоинтенсивных областей спорадического слоя E дрейфует в северном направлении. Найденное преобладающее направление движения приводит к предположению о существовании источника металлических ионов в южных широтах, а именно, так называемого фонтанного эффекта. Также были выявлены скорости перемещений высокоинтенсивных E_s -слоев, преимущественно оказавшиеся в диапазоне $50 \div 120$ м/с.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе, обозначены возможные направления дальнейших исследований.

1) Разработанное программное обеспечение, управляющее ионозондом, позволило качественно улучшить его частотно-временные параметры даже без существенной аппаратной модернизации. Программный пакет «Циклон-Рapid» обладает широкими функциональными и сервисными возможностями, позволяет управлять ионозондом «Циклон» и производить сжатие и обработку ионограмм, полученных ионозондами «Циклон», «Вертикаль-С1», «Сойка-М», «Базис-МС» и «CADI».

В результате проведенной серии экспериментов по наблюдению сигналов ОРР на коротких трассах показана возможность исследования параметров искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностей с помощью радиоволн в диапазоне $2 - 7$ МГц, излучаемых ионозондом «Циклон», что позволило исследовать суточную зависимость характерных времен релаксации сигналов ОРР.

2) Создано программное обеспечение для автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования. Используемый в нем метод гистограммных распределений позволил увеличить скорость обработки ионограмм, не ухудшая качество конечного результата. Система устойчиво обрабатывает ионограммы, полученные в условиях средневозмущенной ионосферы. Экспресс-анализ позволяет корректно обрабатывать около 80% ионограмм. Коэффициент ранговой корреляции по Кендаллу при этом между этими реализациями рядов колеблется в диапазоне 0,8-0,84.

Добавление к гистограммной обработке эвристического анализатора позволило повысить качество результатов обработки. В сложных случаях, при невозможности интерпретации результатов селектором выбора возможно либо привлечение оператора, либо отбрасывание недостоверных данных, либо экстраполирование результатов, в зависимости от поставленной задачи.

3) В результате исследования пространственно-волновых эффектов планетарных волн в параметрах слоя *E_s* обнаружено, что:

- проявления планетарных волн в спорадическом слое *E* наблюдаются во все сезоны года. Характер наблюдающихся волн квазистационарный, т.е. участки с неизменной или медленно перемещающейся фазой перемежаются резкими фазовыми скачками в течение 1–2 суток с последующим проявлением волны с другой начальной фазой;
- для некоторых планетарных волн определены характерные периоды их существования, составляющие 4–6 ($m=2$) и 20–24 суток ($m=1$), направление движения этих волн – преимущественно с востока на запад;
- выявлены зоны зарождения описанных волн, которые в основном соответствуют двум областям – 30–60° и 210–240° географической долготы.

4) При исследовании данных ионосферных станций, находящихся в узком широтном интервале, выявлены:

- квазидвухлетние вариации в зональных перемещениях высокоинтенсивных спорадических слоев *E* для периода с мая по сентябрь на высоте 110 км. Такой вывод дает повод предположить взаимосвязь этой периодичности с квазидвухлетней осцилляцией зональной составляющей экваториального стратосферного ветра. Это свидетельствует о взаимодействии приэкваториальной стратосферы с нижней термосферой средних широт посредством передачи энергии внутренних гравитационных волн.

При анализе данных цепочек ионосферных станций, географически расположенных в узких долготных интервалах, выявлено, что большая часть высокоинтенсивных областей спорадического слоя *E* дрейфует в северном направлении. Найденное преобладающее направление движения приводит к предположению о существовании источника металлических ионов в южных широтах, а именно, так называемого фонтанного эффекта.

Основные публикации автора по теме диссертации:

Свидетельства об официальной регистрации программы

1. Св.№ 2013612329 Program for Registration, Save and Send Ionograms (21.02.2013) / Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Шерстюков О.Н.- №2012661624, Заявл. 25.12.2012
2. Св.№ 2013612330 Program for Manual of Ionogram Scaling (21.02.2013) /

Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Шерстюков О.Н.- №2012661622, Заявл. 25.12.2012

3. Св.№ 2013612331 Program for Autoscaling of Vertical Incident Ionograms (21.02.2013) / Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Шерстюков О.Н., Шерстюков Р.О.- №2012661621, Заявл. 25.12.2012

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Сапаев А.Л., Шерстюков О.Н. Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования // Ученые записки КГУ. 2008. Т.150. Кн.3. с.36-45.

2. Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Эффекты планетарных волн в параметрах слоя Es // Геомагнетизм и аэрномия, Т. 49, №4, 2009 с.545-549.

Zykov E.Yu., Sherstyukov O.N., Akchurin A.D. Effects of Planetary Waves in Parameters of the Midlatitude Sporadic E Layer // Geomagnetizm and aeronomy, Vol. 49, No. 4, 2009, p.519-524

3. Е.Н. Сергеев, Е.Ю. Зыков, А.Д. Акчурин, И.А. Насыров, Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов, В.Ю. Ким, В.П. Полиматиди, С.М. Грач Результаты комплексных исследований возмущенной области ионосферы с помощью КВ-локации в широкой полосе частот и искусственного радиоизлучения ионосферы // Изв. ВУЗов, Радиофизика, 2012, Т.55, №1-2, С. 79-93.

Sergeev, E.N., Zykov, E.Yu., Akchurin, A.D., Nasyrov, I.A., Vertogradov, G.G., Vertogradov, V.G., Kim, V.Yu., Polimatidi, V.P, Grach, S.M. Results of integrated studies of the perturbed ionosphere region using short-wave ranging in a wide frequency band and stimulated electromagnetic emission of the ionosphere // Radiophysics and Quantum Electronics. 2012. Volume 55, Numbers 1-2, pp.71-84.

4. Болотин И.А., Фролов В.Л., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Юсупов К.М. Диагностика искусственных ионосферных неоднородностей с использованием коротких радиотрасс зондирования // Изв. ВУЗов, Радиофизика, 2012, Т.55, №1-2, С. 66-78.

Bolotin, I.A., Frolov, V.L., Akchurin, A.D., Zykov, E.Yu., Yusupov, K.M. Diagnostics of artificial ionospheric irregularities using short sounding radio paths // Radiophysics and Quantum Electronics. 2012. Volume 55, Numbers 1-2, pp. 59-70.

5. Бахметьева Н.В., Фролов В.Л., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Болотин И.А., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю. О формировании искусственных плазменных возмущений в нижней ионосфере // Изв. ВУЗов, Радиофизика, 2012, Т.55, №1-2, С. 106-121.

Bakhmet'eva, N.V., Frolov, V.L., Vyakhirev, V.D., Kalinina, E.E., Bolotin, I.A., Akchurin, A.D., Zykov, E.Yu. Formation of artificial plasma disturbances in the lower ionosphere // Radiophysics and Quantum Electronics. 2012. Volume 55, Numbers 1-2, pp. 95-109.

Публикации в других изданиях

6. Е.Ю. Зыков, О.Н. Шерстюков, А.Д. Акчурин Исследовательский ионозонд "Циклон" Казанского университета и программное обеспечение автоматической обработки ионограмм // Гелиогеофизические исследования, Выпуск 4, С.39-46, 2013

7. Е.Ю.Зыков, О.Н.Шерстюков, А.Д.Акчурин Мультиформатная обработка ионограмм вертикального зондирования ионосферы // Труды XXVIII Всероссийского симпозиума "Радиолокационное исследование природных сред", 16-17 апреля 2013, Т.№2, С.263-270
8. Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Сапаев А.Л., Назаренко В.И., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю. Цифровой ионосферный комплекс «Циклон-9». Казанский ун-т.-Казань, 1994. Рус.-Деп. в ВИНТИ. № 518-В94. 17.06.94.
9. Зыков Е.Ю., Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Автоматическая обработка ионограмм в ионосферном комплексе «Циклон-10» // Ионосферные исследования. М. 1997. № 50. С.232-243.
10. Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Сапаев А.Н., Шерстюков О.Н. Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования Электронный журнал "Исследовано в России", №5, 2007, стр. 52-64, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/005.pdf>
11. Akchyurin A.D., Minullin R.G., Nazarenko V.I., Sherstyukov O.N., Sapaev S.A., Zykov E.Yu. The ionospheric complex «Cyclon» // Ionosonde networks and stations. World data centre-A for solar-terrestrial physics. Boulder. 1995. Report UAG-104. P.35-36
12. Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Эффекты планетарных волн в параметрах спорадического среднеширотного слоя E // Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород. 2-4 июля 2002. С.326-327.
13. Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Программно-аппаратный комплекс вертикального зондирования ионосферы «Циклон-М» // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2005. Таганрог. 20-25 июня 2005. С.428-430.
14. Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Шерстюков О.Н. Ионосферный комплекс «Циклон-М» // Труды XXIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». Санкт-Петербург. 19-21 апреля 2005 г.
15. Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Эффекты планетарных волн в параметрах спорадического слоя Es // Сб. докл. XXI Всероссийской конференции «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола. 2005. С.202-206.
16. Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Шерстюков О.Н. Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2007. Таганрог. 25-30 июня 2007. Т.2. С.91-96.
17. Е.Ю.Зыков, О.Н.Шерстюков, А.Д.Акчурин. Квазистационарные планетарные волны в параметрах спорадического среднеширотного слоя Es // Труды XXII Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн", Ростов-на-Дону, 22-26 сентября 2008. Том 1. с.137-140.
18. А.Д. Акчурин, В.Ю. Ким, В.А. Панченко, В.П. Полиматиди, А.А. Понятов, В.П. Урядов, В.Л. Фролов, Е.Ю. Зыков. Результаты исследования обратного рассеяния радиоволн от искусственных ионосферных неоднородностей с помощью двух КВ радаров // Труды XXII Всероссийской

- научной конференции «Распространение радиоволн», Ростов-на-Дону, 22-26 сентября 2008. Том 2. с.175-178.
19. Сергеев Е.Н., Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Насыров И.А., Вертоградов Г.Г., Ким В.Ю., Грач С.М., Урядов В.П. Результаты комплексных исследований возмущенной области ионосферы с помощью КВ-локации в широкой полосе частот и искусственного радиоизлучения ионосферы // Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 23-26 мая 2011. Том 2, С.269-273.
 20. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P., Sahai Y., MacKinnell L.-A., Lynn K.J.W., Vlasov A.A., Vesnin A.M., Rios V.H., Zykov E.Yu., Habarulema J.B., de Abreu A.J. // Model/data comparison of the ionospheric effects at the separate stations during geomagnetic storms on September 2005 // Proceedings of 13th International Ionospheric Effects Symposium, May 17-19, Alexandria, Virginia, 2011.
 21. Зыков Е.Ю., Сергеев Е.Н., Акчурин А.Д., Насыров И.А. Исследования динамических характеристик сигналов обратного рассеяния от области искусственной ионосферной турбулентности на КВ-радаре "Циклон" // Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 23-26 мая 2011. Том 2 С.235-239.
 22. Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Юсупов К.М., Болотин И.А., Фролов В.Л. Диагностика искусственных ионосферных неоднородностей на коротких радиотрассах // Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 23-26 мая 2011. Том 2 С.185-189.
 23. Фролов В.Л., Болотин И.А., Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Вертоградова Е.Г., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Юсупов К.М. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей // Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 23-26 мая 2011. Том 2 С.285-289.